天山北坡经济带水库群时空变化特征及驱动机制

王 婷[1]， 沈赣华[2]， 刘 兵[1,3]， 孙莹琳[1]， 汪再光[4]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 新疆德润经济建设发展有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000；3. 石河子大学，寒旱区生态水利工程兵团重点实验室，新疆 石河子 832000；4. 石河子天兴水利勘测设计院，新疆 石河子 832000）

摘　要：为验证天山北坡经济带水库群建设在时间上的延续性及空间上的均衡性，利用1990—2020年遥感数据提取各水库水域面积，结合统计资料分析水库数量和库容变化过程，采用莫兰指数量化水库空间分布的聚集程度，建立时空地理加权回归模型分析水库驱动因素。结果表明：近30 a来，研究区水库水域面积呈先增后减的变化趋势，其中，1990—2015年增加了46.25%，2015—2020年减少了1.63%。水库数量和库容呈增长趋势，分别增长了64.94%、71.06%。1990—2020年各代表年份（1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年）水库莫兰指数分别为0.81、0.83、0.79、0.91、0.66、0.73、0.78，水库空间分布存在正相关性。水库分布高值区主要在奎屯河流域的农业灌溉区，低值区主要在以乌鲁木齐市为代表的工业区。影响水库库容变化的主要因素有蒸发量、降雨量、高程、人口和生产总值等。蒸发量对库容有负向影响，降雨量的影响在空间上具有不确定性，高程和人口对西段水库建设有正向影响，对东段水库建设有负向影响，生产总值对东段及西段部分区域水库建设有正向影响，对中段水库建设有负向影响。研究结果可为同类地区水库规划建设及运行管理提供参考依据。

关键词：水库；时序变化；空间分布特征；驱动力；时空地理加权回归

水库是重要的径流调节设施，在防洪安全、水资源开发利用、生态环境保护等方面发挥着巨大作用[1]。受自然条件和人类活动等因素的影响，区域水库具有长期演变、分布差异明显的特征[2-3]。研究水库群时空演变规律，探究其驱动因素，可以及时精确地掌握区域水库的建设过程，有助于了解水库与自然气候及人类活动之间的相关性，对区域水利工程的规划建设及运行管理具有重要意义[4-5]。

随着光学遥感技术的快速发展与精度提高，借助遥感影像，利用RS和GIS技术提取水库水体信息，分析其时空演变特征已在国内外不同研究尺度上取得重要进展。相较于传统的研究方法，光学遥感数据具有实时、成本低和水体提取精度高等优点[6-8]，为水库动态变化研究提供了有效的技术手段[9-10]。马振刚等[11]利用1980—2021年Landsat卫星遥感影像对官厅水库和密云水库水域面积进行动态监测。Donchyts等[12]对全球范围内中小型水库进行动态监测，发现中小型水库年际及年内空间变化不均匀。李健锋等[13]基于Landsat TM/OLI数据分析了斯里兰卡湖库空间分布特征及时间变化规律，发现1995—2015年全岛内陆湖库的水体面积呈大幅度增长趋势。目前，对于水库时空动态变化研究偏重于分析其水域面积变化情况，且主要针对单一库区或某一特定水库群进行分析，缺少长时段、区域尺度水库时空动态变化特征及驱动因素的研究，然而精确掌握区域水库时空分布情况及驱动因素，可在一定程度上了解水库的区域变化及时空差异[14]，故对此可开展进一步研究。

在驱动力分析方面，目前研究大多利用统计学方法建立驱动因子与水体变化因子之间的相关性模型，以探究水体变化的主要驱动因素。Du等[15]通过建立结构方程模型分析了引起东北嫩江流域湖

收稿日期：2024-04-19； **修订日期：**2024-06-03
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目（2022xjkk090207，2021xjkk0804）；兵团科技攻关计划项目（2021AB021）；石河子大学高层次人才科研启动项目（RCZK202026）
作者简介：王婷（2001-），女，硕士研究生，主要从事水资源高效利用研究. E-mail：2496878250@qq.com
通讯作者：刘兵. E-mail：515441180@qq.com

泊和水库变化的驱动因素。杨昀则等[16]利用皮尔逊相关系数分析了年均降水量、人口密度等与浙江省水域系统水体面积的相关性。于成龙等[17]利用地理探测器分析了自然和人为因素对西辽河流域湿地变化的驱动效应。李娜娜等[18]采用典型相关分析法,对四川省湿地变化的驱动力进行了探究。综上所述,现有研究大多从自然气候条件及人类活动两个层面选取引起水体变化的驱动因子进行驱动力分析,主要包括降雨量、气温及生产总值等。

天山北坡经济带是新疆最具发展潜力的区域,对疆内其他区域的经济发展有着带动、辐射作用[19]。自20世纪90年代以来,为满足绿洲农业灌溉和生活供水的需求,该区域水库建设呈大幅度增长趋势[20]。水库群的建设在一定程度上缓解了用水矛盾及水安全问题,促进了该区域的发展建设。为验证该区域水库建设在时间上的延续性及空间上的均衡性,本文通过分析天山北坡经济带水库群时空变化特征,探究水库工程规划建设的主要驱动因素,以期为同类地区水库规划建设及运行管理提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

天山北坡经济带处于42°92′~46°21′N、83°41′~88°98′E,是"一带一路"沿线经济文化建设核心区,是推动西北经济对外开放、加强我国与中亚国家联系的关键节点,属于国家区域经济规划重点建设的综合经济带[21]。主要包括乌鲁木齐、克拉玛依、昌吉市等区域(图1)。该经济带集中了新疆77.60%的重工业及66.50%的轻工业,是全疆生产力最集中的区域。此外,该区域历年的生产总值占新疆总体50%以上[22],对疆内其他区域的经济发展有着带动、辐射的作用。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感影像的选取与处理 本文选取1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年作为代表年份,利用Google Earth Engine平台,获取各代表年份天山北坡经济带的遥感影像。其中,1990年、1995年的影像数据来源于Landsat 5_SR数据集;2000年、2005年、2010年的影像数据来源于Landsat 7_SR数据集;2015年和2020年的遥感影像来源于Landsat 8_SR数据集。为获得较为清晰的影像,选取了各年份4—6月、云量小于20%的高分辨率遥感影像数据,并对所获取的遥感影像进行空间几何校正、栅格合并、剪裁等预处理。结合地图和统计资料,对获取到的遥感影像进行人工目视解译,选取影像中水体纹理及颜色相对一致,人工塑造痕迹明显的水体位置作为水库所在地,并勾绘其边界形状形成水库图斑。

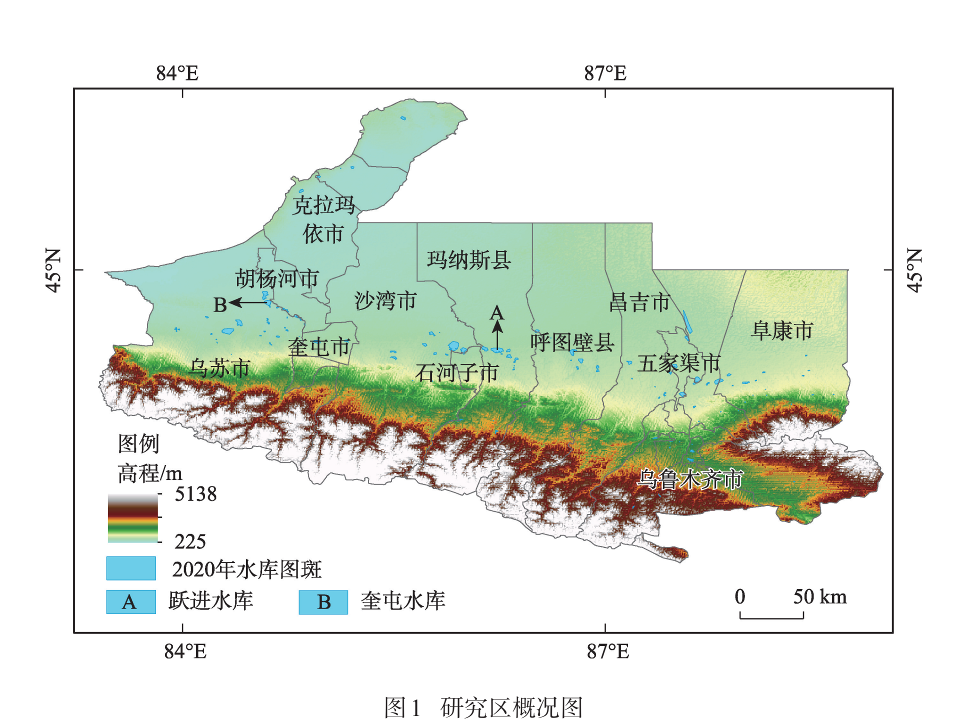


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

为了验证水库水体提取的精度，本文以分布在研究区的奎屯水库及跃进水库作为研究对象（图2），利用ENVI 5.6软件采用归一化水体指数（Normalized Difference Water Index，NDWI）对2020年这两个水库水体进行提取，并将NDWI计算得到的水库水体面积作为实测值，与人工目视解译得到的水体面积进行比较。结果显示NDWI计算得到奎屯水库及跃进水库的水体面积分别为11.07 km^2、18.15 km^2，目视解译得到的分别为11.55 km^2、19.33 km^2，相对误差分别为4.16%、6.10%，说明水库提取精度较高，可进一步分析。

1.2.2 *驱动因子指标体系* 水库的规划建设主要受自然地理因素和社会经济因素影响[23-25]。本文根据驱动因子的代表属性，选取高程（Digital Elevation Model，DEM）、蒸发量、降雨量、人口密度及生产总值（Gross Domestic Product，GDP）进行驱动力分析（表1）。这些数据均来自资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/），空间分辨率均为1 km。其中，蒸发量、降雨量、人口密度及生产总值数据时间跨度为1990—2020年，每十年一期。由于缺少1990年的人口密度及生产总值数据，遂用1995年的数据代替。

1.3 研究方法

1.3.1 *动态指数* 为反映研究区某一时间段水库水域面积、数量和库容动态变化情况，引入动态指数作为衡量指标[26]。动态指数是指某一时段研究区水库水域面积、数量和库容在时间上的变化，其表达式如式(1)所示。

$$K = \frac{A_\alpha - A_\beta}{A_\beta} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中：K为某一研究时段内水库群的动态指数；A_α表示研究时段末期水库群水域面积(km^2)、数量(座)或库容(10^8 m^3)；A_β为研究时段初期水库群水域面积(km^2)、数量(座)或库容(10^8 m^3)；T表示研究时段(年)。

1.3.2 *全局空间自相关* 为了量化研究区水库群的聚集程度，充分体现水库之间的相关关系，本文采用全局空间自相关分析水库空间分布特征[27]，以莫兰指数(Moran's I)作为度量空间相关性的指标。莫兰指数是反映具有空间位置的某要素观测变量与其相邻空间点上的观测值是否存在相似性或相异性或随机性的指标值[28]。Moran's I的计算公式如公式(2)所示。

$$\text{Moran's } I = \frac{N\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中：N代表研究区内水库的样本总数；w_{ij}是第i个和第j个样本之间的权重矩阵；x_i表示第i个空间区域内样本的测量值；x_j为第j个空间区域内样本的测量值；$\bar{x}$则代表的是所有样本测量值的平均值。

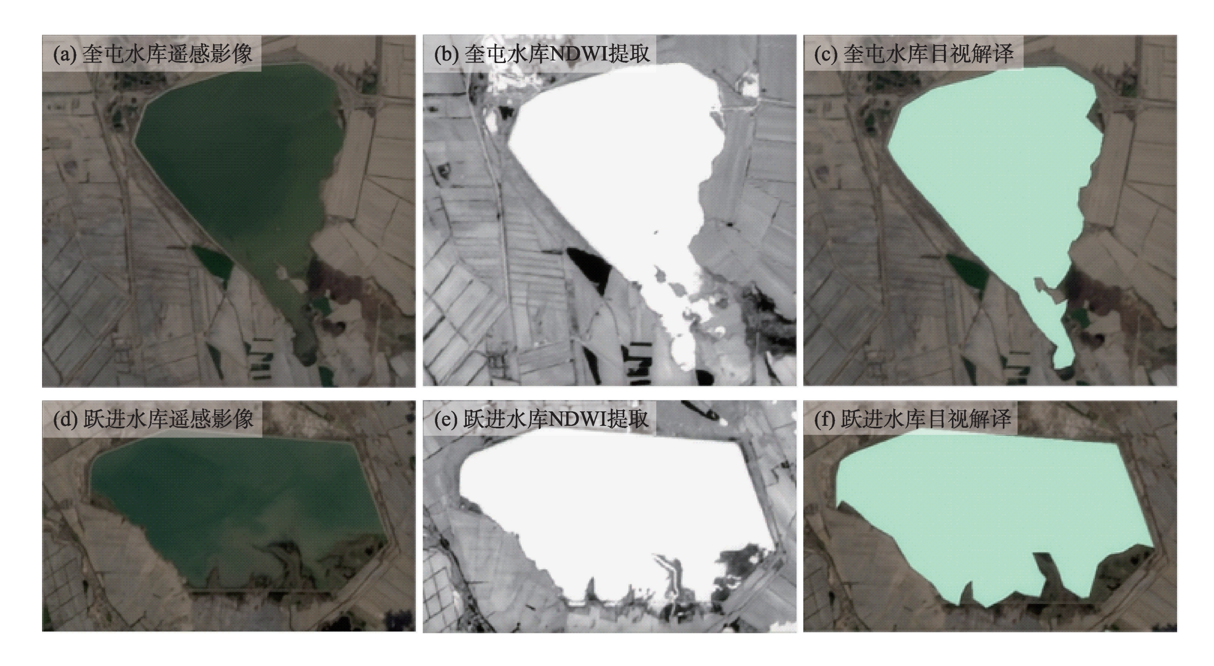


图2 奎屯水库和跃进水库提取效果对比

Fig. 2 Comparison of extraction effect between Kuitun Reservoir and Yuejin Reservoir

表1　自然地理及社会经济相关数据

Tab. 1　Physical geography and socio-economic data

驱动因素	驱动因子	数据集名称
自然地理因素	年均蒸发量/mm	中国气象要素平均状况空间插值数据集
	DEM/m	全国 DEM 1 km、500 m 和 250 m数据
	年均降雨量/mm	中国气象要素平均状况空间插值数据集
社会经济因素	人口密度/(人·km^{-2})	中国人口空间分布公里网格数据集
	生产总值/(10^4元·km^{-2})	中国GDP空间分布公里网格数据集

1.3.3　时空地理加权回归模型　地理加权回归模型是研究空间异质性的经典模型,该模型虽然考虑了空间异质性和空间效应,但其对样本数量有一定要求,由于截面数据样本量有限,导致模型结果受到影响[29]。而时空地理加权模型(Geographically and Temporally Weighted Regression,GTWR)基于地理加权回归模型,将时间赋值到局部样本点数据集上,计算局部样本点的参数,充分利用样本数据的时间特性,提高参数估计的精确度,使得估计结果更为有效[30]。其表达式如公式(3)所示。

$$Y_i=\beta_0(u_i,v_i,t_i)+\sum_{k=1}^{n}\beta_k(u_i,v_i,t_i)x_{ik}+\varepsilon_i \quad (3)$$

式中:Y_i表示第i个样本点的因变量;u_i表示第i个样本点的经度坐标;v_i表示第i个样本点的纬度坐标;t_i表示第i个样本点的时间坐标;(u_i,v_i,t_i)表示第i个样本点的时空维度坐标;$\beta_0(u_i,v_i,t_i)$表示第i个样本点的常数项;$\beta_k(u_i,v_i,t_i)$表示第k个解释变量在第i个样本点的回归系数;x_{ik}表示第i个样本点的第k个自变量;ε_i表示随机误差。

2　结果与分析

2.1　水库时序变化

由图3可知,近30 a来天山北坡经济带水库水域面积在220.52~317.33 km^2,总体呈先扩张后减少的变化趋势。1990—2015年水域面积持续扩张,由220.52 km^{2}扩张至322.51 km^2,增加了46.25%,动态指数为1.85%。其中,1990—1995年水域面积扩张最为明显,在该时段面积增加了27.03 km^2。自2015年开始,水域面积出现小幅度减少,由322.51 km^{2}减少至317.33 km^2,动态指数为−0.32%。这种变化趋

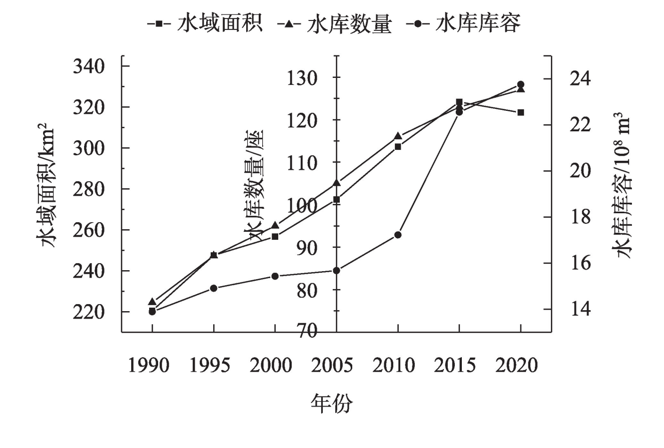


图3　天山北坡经济带1990—2020年水库数量、水域面积和库容变化趋势

Fig. 3　The variation trend of reservoir quantity, water area and storage capacity in the economic belt of north slope of Tianshan Mountains from 1990 to 2020

势可能是由自然条件变化及人类活动影响所导致。

1990—2020年水库数量总体呈增加趋势,从77座增加至127座,增加了64.94%,动态指数为2.16%。其中,1990—1995年水库数量动态指数最大,达到了2.86%,水库增加了11座。结合面积和数量变化情况分析,2015—2020年水库水域面积有所减少,但数量呈增加趋势。由此可以判断,该时段已建水库水域面积出现了一定程度的萎缩,且新修建的多为小型水库。此外,近30 a来水库库容呈增长趋势,由13.89×10^8 m^{3}增长至23.76×10^8 m^3,增加了71.06%,动态指数为2.37%。其中,2010—2015年水库库容增长最快,其动态指数为6.20%。

2.2　水库空间变化

本文以各代表年份水库水域面积作为研究对象,计算各代表年份的莫兰指数并检验指数值的显著性,结果如表2所示。从表2可以看出,1990—2020年各代表年份水库莫兰指数分别为0.81、0.83、0.79、0.91、0.66、0.73、0.78,均大于0,且各年份标准差均大于阈值(2.58),满足概率小于0.01的显著性检验,表明各年份水库空间分布较为聚集,且存在明显的空间正相关性,即水库分布较为聚集的地区及其周围区域水库水域面积扩张速度较快,水库分布越来越聚集。

为较好地反映研究区水库空间分布特征以及动态变化情况,绘制1990—2020年水库水域面积空间分布图,并以此分析研究区水库的空间分布特点、疏密特征以及动态演变中的偏移趋势。

表2 水库Moran's *I*指数与检验

Tab. 2 Moran's *I* and test of reservoir

代表年份	Moran's *I*	标准差	概率
1990年	0.81	17.97	0.00
1995年	0.83	17.53	0.00
2000年	0.79	18.96	0.00
2005年	0.91	19.79	0.00
2010年	0.66	18.80	0.00
2015年	0.73	21.27	0.00
2020年	0.78	22.18	0.00

由图4可知,水库分布高值区主要集中在乌苏市、沙湾市、玛纳斯县等农业较发达的区域。相对于自然降水补给,水库对农田用水的供应更有保障,这使得农业灌溉用水成为影响水库空间分布的重要因素。水库分布低值区主要集中在达坂城区、独山子区、新市区、头屯河区等工业较为发达的区域,其可能原因是这些区域社会经济水平较高,城市化率较高,不适宜水库等大型工程的建设。随着时间的推移,各区域水库水域面积在原有范围内不断扩张,东段和西段变化较为剧烈。其原因为西段水资源丰富,农业规模较大,需修建水库满足灌溉需求。此外,随着东段社会经济的发展,带动了该区域水库的建设。

2.3 驱动力分析

分析导致水库变化的自然气候及人类活动因素,对研究区水库规划建设具有重要意义。为进一步探究各驱动因子对水库规划建设的作用方向及影响强度的时空差异,本文利用Huang等[31]制作的时空地理加权回归中的ArcGIS 10.7的插件,计算1990—2000年、2000—2010年、2010—2020年3个时间段各驱动因子对水库库容影响参数的平均值,运用自然断点法对各驱动因子参数平均值进行分类,并由此绘制驱动因素回归系数时空分布图。

由图5可知,研究期内,年均蒸发量对各县级水库库容均为负驱动作用,且呈现出东段强西段弱的格局。其中,年均蒸发量对阜康市、五家渠市水库库容影响最大,其次是乌鲁木齐市、昌吉市等区域,较弱的有克拉玛依市、胡杨河市等。从变化趋势来看,大部分区域年均蒸发量相关系数逐渐减小,对水库的负驱动作用增强,其原因是年均蒸发量与水

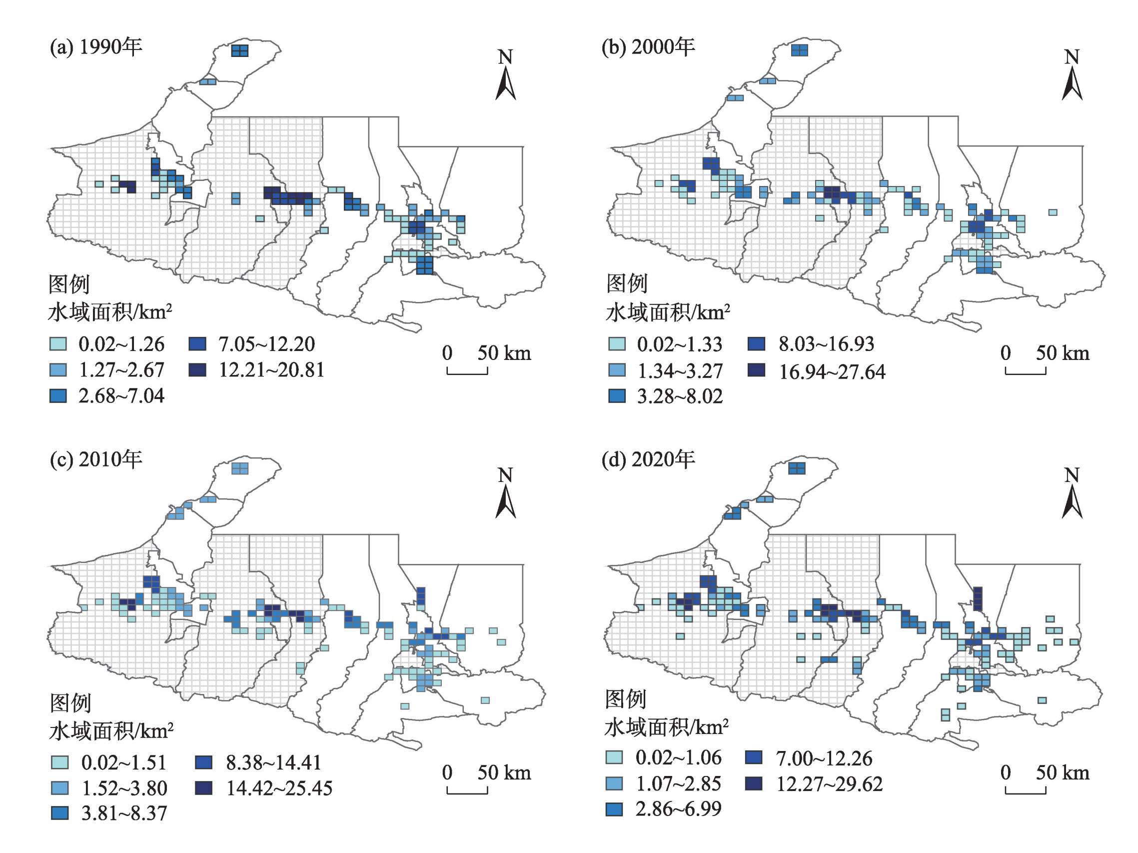


图4 1990—2020年天山北坡经济带水库水域面积空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of reservoir water area in the economic belt of north slope of Tianshan Mountains from 1990 to 2020

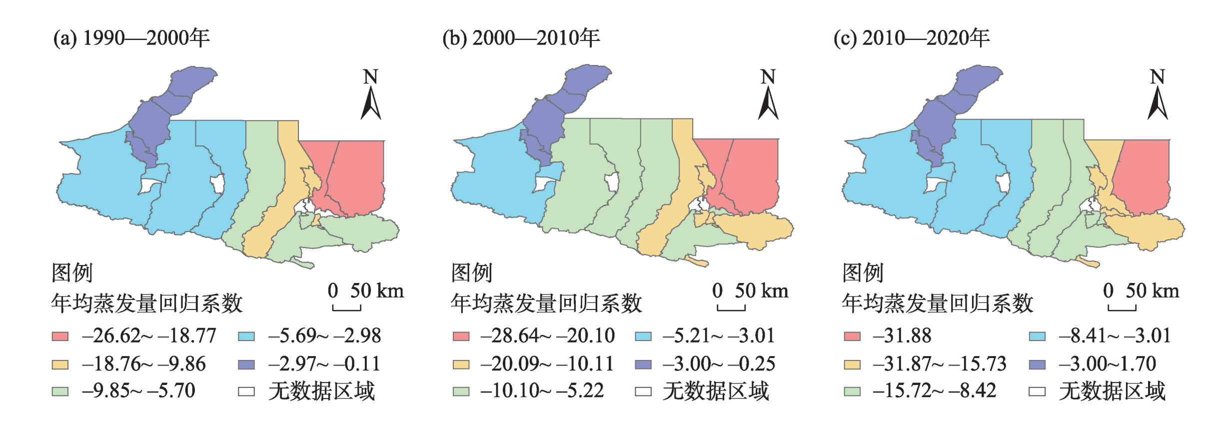


图5　天山北坡经济带年均蒸发量回归系数时空分布

Fig. 5　Temporal and spatial distribution of annual evaporation regression coefficient in the economic belt of the northslope of Tianshan Mountains

库库容存在负相关关系。

由图6可知，年均降雨量对水库库容的驱动作用在空间上具有不确定性。其中，年均降雨量对阜康市、达坂城区水库库容产生明显的正向影响，对克拉玛依市、玛纳斯县产生明显的负向影响。研究期内，各区域平均降雨量回归系数逐渐增加，说明降雨量对水库库容的促进作用增强。由于研究区位于亚欧大陆腹地，属典型的温带大陆性气候，年降水量较小。受多种因素的影响，降雨量分布特征较为复杂，且时空分布不均匀[32]，这也导致降雨量对该区域水库群的驱动作用具有不确定性。

由图7可知，高程对水库库容的影响在西段表现为正向驱动，在东段表现为负向驱动。其中，高程对阜康市、乌鲁木齐市水库库容负向影响最大，其原因是该区域地势平整，社会经济水平较高，城镇化率较高，不适合水库群的建设。高程对克拉玛依市、玛纳斯县水库库容正向影响最大，其原因是该区域地势较低，水库修建难度小，且需要修建水库来满足灌溉、生活等多方面用水需求。

由图8可知，平均人口密度对研究区西段水库库容为正驱动作用，对中段和东段为负驱动作用。其中，人口密度对乌苏市水库库容正向影响最大，对五家渠市、阜康市负向影响最大。从变化趋势来看，西段平均人口密度回归系数逐渐增大，中段和东段平均人口密度回归系数逐渐减小。近30 a来，人口数量剧增，对水资源消耗量较大，为满足用水需求，研究区修建了大量水库。但由于自然条件等诸多因素限制，中段和东段修建的水库多为小型水库，相较于人口增长速度，该区域水库增长缓慢，水库发展建设与人口增长存在一定差距，致使人口对水库库容产生负向影响。

由图9可知，生产总值对西段部分区域及东段水库库容产生正驱动作用，对中段产生负驱动作用。其中，生产总值对乌苏市水库库容的正向驱动

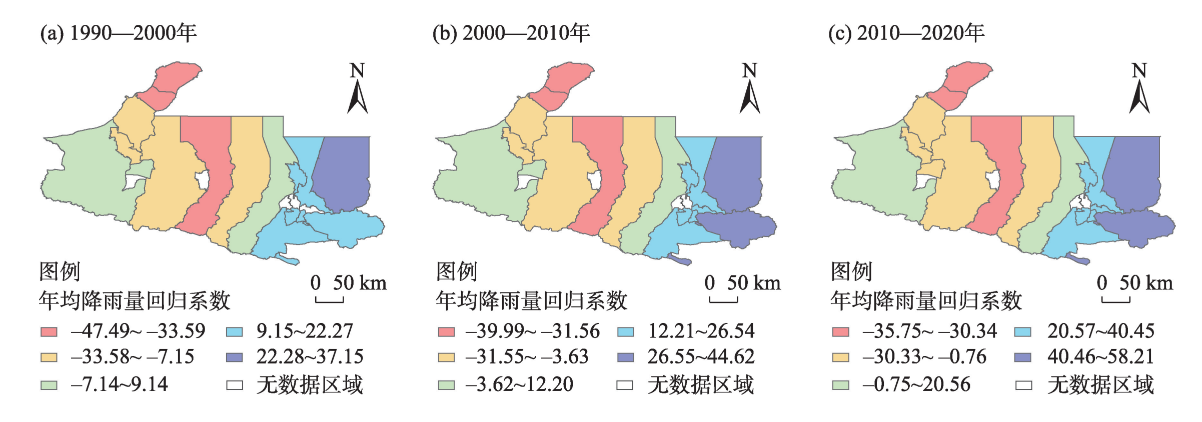


图6　天山北坡经济带年均降雨量回归系数时空分布

Fig. 6　Temporal and spatial distribution of annual average rainfall regression coefficient in the economic belt of north slope of Tianshan Mountains

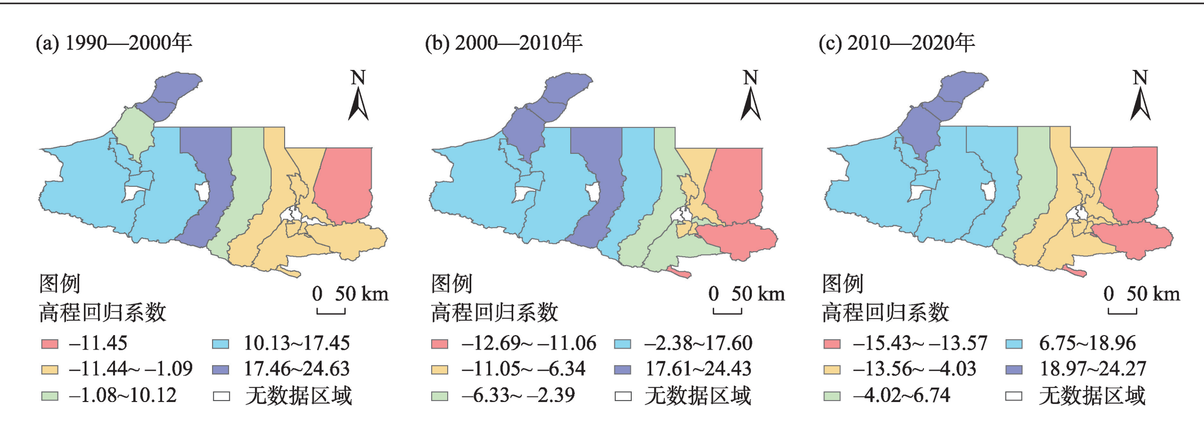


图7 天山北坡经济带高程回归系数时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of elevation regression coefficient in the economic belt of north slope of Tianshan Mountains

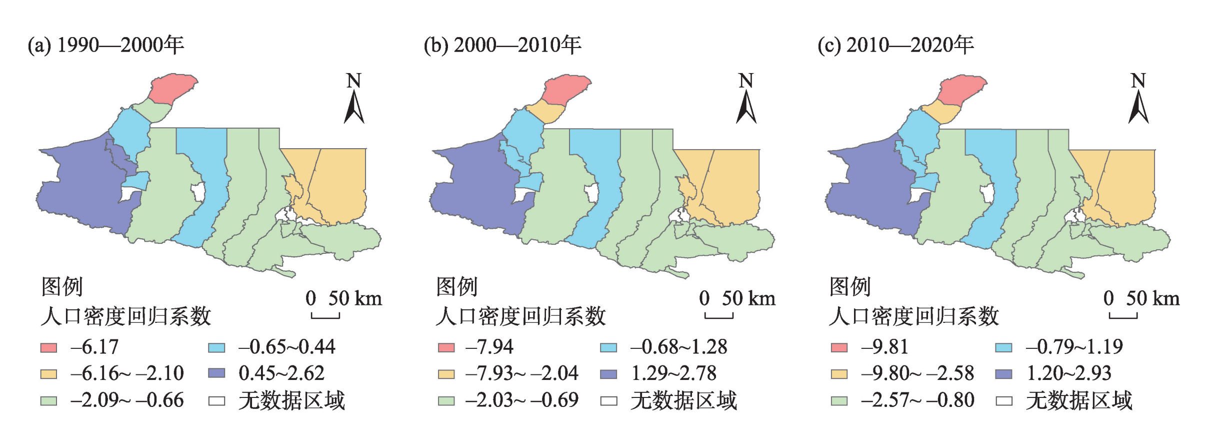


图8 天山北坡经济带人口密度回归系数时空分布

Fig. 8 Temporal and spatial distribution of population density regression coefficient in the economic belt of north slope of Tianshan Mountains

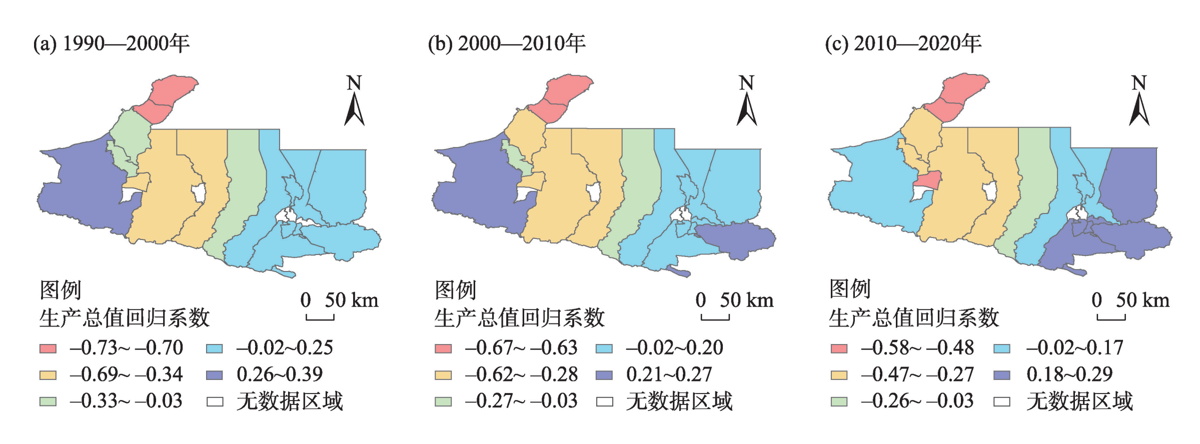


图9 天山北坡经济带生产总值回归系数时空分布

Fig. 9 Temporal and spatial distribution of gross product regression coefficientin the economic belt of north slope of Tianshan Mountains

作用逐渐减弱，对乌鲁木齐市及阜康市的正向驱动作用逐渐增强。其主要原因是乌苏市地处奎屯河流域，水资源相对丰富，且农业占据重要地位。随着经济实力的提升，研究区优先在水资源丰富的地区修建水库，以满足用水需求。同时，随着乌鲁木齐市及阜康市社会经济水平的提高，工业和城市用

水需求不断增加，推动了该区域水库建设。

为探究降雨量和蒸发量对水库的具体影响，本文利用1990—2020年研究区各区域水库库容、年均降水量及年均蒸发量数据，绘制水库库容、年均降雨量及年均蒸发量变化图，如图10所示。

由图10可以看出，近30 a来，各区域年均降雨量变化较为剧烈，大致呈先增后减的变化趋势。其中，昌吉市、奎屯市、沙湾市等区域的水库库容与该区域年均降雨量呈现相同的变化趋势。说明在区域尺度上，降雨量作为水量的重要来源，与水库库容具有一定的相关性。这与何思聪等[33]得到武汉城市圈湖泊面积与年均降水量具有相同变化趋势的研究结论一致。

近30 a来，研究区年均蒸发量由1990年的1745.83 mm降低到2020年的1115.22 mm，整体呈下降趋势。与此同时，水库库容增长了83.27%。其中，阜康市、玛纳斯县、乌苏市等区域的水库库容与该区域年均蒸发量变化趋势相反，说明蒸发量与水库库容具有一定的负相关关系。这与李旭冰等[34]发现随着蒸发量的减小，赛里木湖和艾比湖面积变化逐渐趋于平缓的结论一致。

为进一步分析人口密度及高程对研究区水库分布的影响程度，本文利用ArcGIS 10.7软件对人口密度及高程进行重分类，并与2020年水库数量进行叠加分析，结果如图11所示。其中，人口密度分为<50 人·km^{-2}、50~100 人·km^{-2}、100~200 人·km^{-2}、200~500人·km^{-2}、500~1000人·km^{-2}、>1000人·km^{-2}六类，高程划分为<500 m、500~1000 m、1000~1500 m、

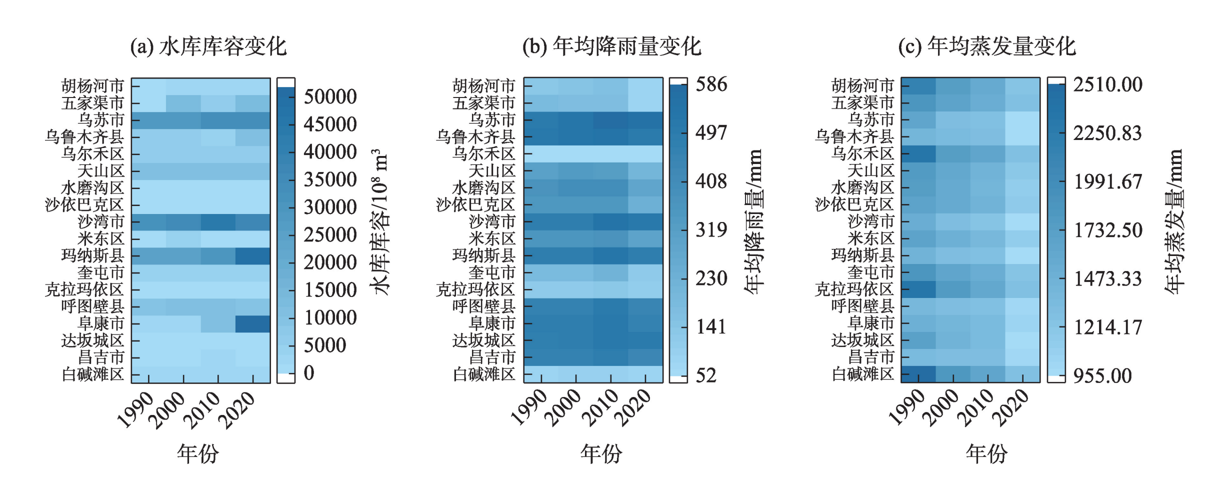


图10　1990—2020年天山北坡经济带各区域水库库容、年均降雨量及年均蒸发量变化

Fig. 10　Changes of reservoir capacity, average annual rainfall and average annual evaporation in each region of the economic belt of north slope of Tianshan Mountains from 1990 to 2020

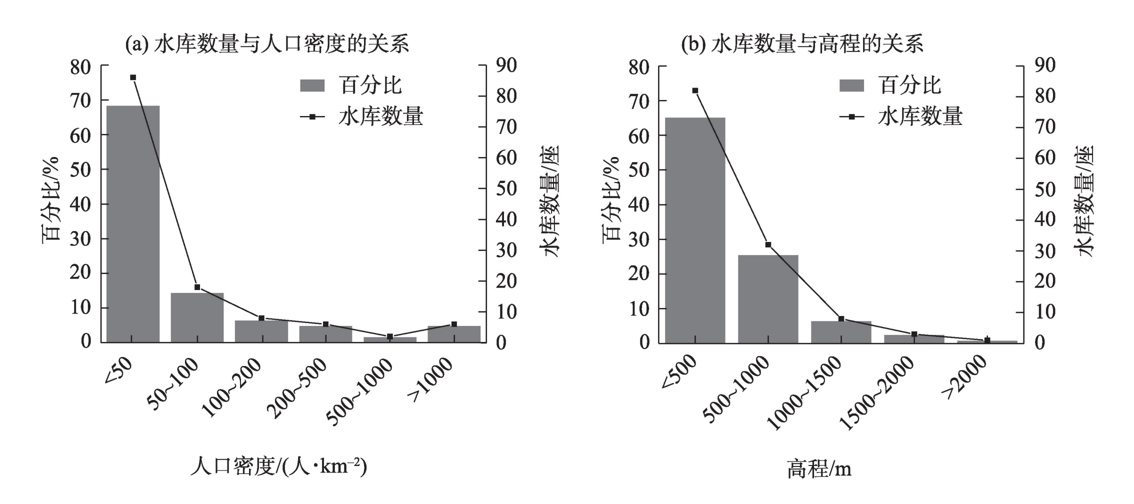


图11　水库数量与人口密度及高程的关系

Fig. 11　Relation between reservoir quantity, population density and altitude

1500~2000 m、>2000 m五类。

由图11可知，在平均人口密度<50人·km^{-2}的区域，水库分布最多。其主要原因是该区域人口密度较小，库区居民不多，湖泊河流较为聚集，且靠近人口聚集区，适合水库的规划建设。在人口密度>1000人·km^{-2}的区域，水库占研究区总水库数量的4.76%，说明在人口高度聚集的区域，仍需在其所在流域修建水库来缓解供需水之间的矛盾。

此外，随着高程的升高水库分布逐渐减少。在高程>2000 m的区域，水库分布最少，占研究区总水库数量的0.79%，说明地势高程对水库的分布具有一定的影响。高程较高的区域存在社会经济发展滞后、人类活动弱等问题，且对水库修建技术要求较高，使得高海拔区域水库分布较少。但随着筑坝技术的快速发展及水资源高效利用意识的增强，研究区开始侧重于在山区修建水库。根据李江等[35]的研究，未来山区水库的修建会成为新疆水库建设的重心。

3 讨 论

本文以1990—2020年水库统计资料作为基础数据，对天山北坡经济带水库进行时空动态变化分析。研究表明，近30 a来研究区水库处于增长状态。其中，2000—2010年为水库建设高峰期。这与李江等[20]的研究结果不同，其研究指出新疆水库整体上呈增长趋势，2010—2020年为北疆水库建设高峰期。本文所选研究区属北疆部分区域，据统计资料，北疆已建水库328座，研究区已建水库仅占北疆水库的39.33%。由于本文并未对北疆全部水库进行统计分析，致使研究结果不同。从空间角度分析，水库主要集中在乌苏市、沙湾市、玛纳斯县等农业较发达的区域。水库作为灌溉的主要供水来源，为农田用水提供了可靠保障，这也使得农业灌溉成为影响水库空间分布的重要因素。

本文采用动态指数和全局空间自相关分析天山北坡经济带水库群时空动态变化特征，并采用时空地理加权回归分析了水库变化驱动因素。这些方法不仅为研究区水库群的规划建设及运行管理提供了理论与技术支撑，同时具有适用性和普适性，能够推广至其他区域的水库群时空动态变化及驱动机制研究。此外，本研究尚有待完善之处，今后的研究可考虑增加农作物种植面积和河流水系分布等因素，进一步分析驱动力，并探讨多个驱动因子对水库群的共同作用。

4 结 论

本文以1990—2020年天山北坡经济带水库统计资料作为基础数据，系统探讨了天山北坡经济带水库群时空分布演变特征及驱动因素，研究结论如下：

（1）近30 a来，天山北坡经济带水库群水域面积在220.52~317.33 km^2，总体呈先扩张后萎缩的变化趋势。水库数量总体呈增加趋势，增加了64.94%。水库库容增长了71.06%。

（2）水库分布高值区主要集中在乌苏市、沙湾市、玛纳斯县等农业较发达的区域，水库分布低值区主要包括乌鲁木齐市、克拉玛依市等工业较发达的区域。

（3）影响水库变化的主要因素有蒸发量、降雨量、高程、人口及生产总值等。蒸发量的减少会降低水库水体的蒸发损失，从而增加水库库容扩大的可能性。其次，降雨量通过影响径流入库流量，进而影响水库水位与蓄水量。此外，高程和人口对水库的分布也有一定的影响，高程较高的区域水库分布较少，而人口密度较低的区域更容易出现水库分布密集的情况。经济水平的提高有助于促进水库的建设。

参考文献（References）：

[1] Liu H, Yin J, Feng L. The dynamic changes in the storage of the Danjiangkou Reservoir and the influence of the South-North Water Transfer Project[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8710.

[2] Lai Y Q, Zhang J, Song Y Y, et al. Comparative analysis of different methods for extracting water body Area of Miyun Reservoir and driving forces for nearly 40 Years[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(2): 451-463.

[3] 刘畅, 唐海蓉, 计璐艳, 等. 长时间序列1984—2020年密云水库水面信息遥感监测与分析[J]. 遥感学报, 2023, 27(2): 335-350. [Liu Chang, Tang Hairong, Ji Luyan, et al. Spatial-temporal water area monitoring of the Miyun Reservoir using remote sensing imagery from 1984 to 2020[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(2): 335-350.]

[4] 吕明权, 吴胜军, 马茂华, 等. 中国小型水体空间分布特征及影响因素[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(8): 1443-1461. [Lv

Mingquan, Wu Shengjun, Ma Maohua, et al. Small water bodies in China: Spatial distribution and influencing factors[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(8): 1443-1461.]

[5] Yang X W, Wang N L, Chen A A, et al. Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960-2018 and their causes[J]. Catena, 2020, 191: 104566.

[6] 李崇巍, 王志慧, 汤秋鸿, 等. 1986—2019年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1153-1168. [Li Chongwei, Wang Zhihui, Tang Qiuhong, et al. Dynamics of surface water area in the Yellow River Basin and its influencing mechanism during 1986-2019 based on Google Earth Engine[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1153-1168.]

[7] Marzi D, Gamba P. Inland water body mapping using multitemporal Sentinel-1 SAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 11789-11799.

[8] 宋奇, 史舟, 冯春晖, 等. 基于1990—2019年多时相影像的干旱区绿洲景观格局分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 594-604. [Song Qi, Shi Zhou, Feng Chunhui, et al. Analysis of landscape pattern from 1990 to 2019 based on multi-temporal imagery in arid oasis[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 594-604.]

[9] Busker T, Roo A D, Gelati E, et al. A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(2): 669-690.

[10] Sheffield J, Wood E F, Pan M, et al. Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions[J]. Water Resources Research. 2018, 54(12): 9724-9758.

[11] 马振刚, 李黎黎, 张俊贵. 官厅和密云水库水域面积变化及影响因素比较研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1229-1239. [Ma Zhengang, Li Lili, Zhang Jungui. Comparative study on water area changes and influencing factors in the Guanting and Miyun reservoirs[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1229-1239.]

[12] Donchyts G, Winsemius H, Baart F, et al. High-resolution surface water dynamics in Earth's small and medium-sized reservoirs[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 13776.

[13] 李健锋, 叶虎平, 张宗科, 等. 基于Landsat影像的斯里兰卡内陆湖库水体时空变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 781-788. [Li Jianfeng, Ye Huping, Zhang Zongke, et al. Spatio-temporal change analysis of Sri Lanka Inland water based on landsat imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(5): 781-788.]

[14] 郝固状, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 红崖山水库近20年面积变化遥感调查及驱动力分析[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 192-201. [Hao Guzhuang, Gan Fuping, Yan Baikun, et al. Remote sensing survey and driving force analysis of area change of Hongyashan Reservoir in the past twenty years[J]. Remote Sensing for Landand Resources, 2021, 33(2): 192-201.]

[15] Du B J, Wang Z M, Mao D H, et al. Tracking lake and reservoir changes in the Nenjiang Watershed, Northeast China: Patterns, trends, and drivers[J]. Water, 2020, 12(4): 1108.

[16] 杨昀则, 田鹏, 李加林, 等. 浙江省水域系统时空变化特征及驱动力分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2022, 49(4): 508-520. [Yang Yunze, Tian Peng, Li Jialin, et al. Analysis on the characteristics and driving forces of spatiotemporal changes of Zhejiang water system[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2022, 49(4): 508-520.]

[17] 于成龙, 王志春, 刘丹, 等. 基于SWAT模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 286-297. [Yu Chenglong, Wang Zhichun, Liu Dan, et al. Evolution process and driving force analysis of natural wetlands in Xiliao River Basin based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 286-297.]

[18] 李娜娜, 高飞, 魏圣钊, 等. 四川省湿地类型变化的自然-社会经济驱动力分析[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5502-5512. [Li Nana, Gao Fei, Wei Shengzhao, et al. Natural and social economy driving forces of wetland types changes in Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5502-5512.]

[19] 赵永玉, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 等. 基于GIS的天山北坡城市群人居环境自然适宜性评价[J]. 生态科学, 2023, 42(5): 84-93. [Zhao Yongyu, Alimujiang Kasmu, Gao Pengwen, et al. Evaluation of natural suitability of human settlements in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountain based on GIS[J]. Ecological Science, 2023, 42(5): 84-93.]

[20] 李江, 柳莹, 吴涛, 等. 新疆水库大坝70年建设成就[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(5): 322-330. [Li Jiang, Liu Ying, Wu Tao, et al. 70 years of dam construction in Xinjiang[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(5): 322-330.]

[21] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 1-11. [Fang Chuanglin. Strategic thinking and spatial layout for the sustainable development of urban agglomeration in northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 1-11.]

[22] 刘琳, 张正勇, 刘芬, 等. 天山北坡经济带城市$PM_{2.5}$质量浓度时空分布及模拟分析[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1849-1857. [Liu Lin, Zhang Zhengyong, Liu Fen, et al. Spatial-temporal distribution and simulation analysis of $PM_{2.5}$ concentration of the cities in the Northern Slope Economic Zone of Tianshan Mountain [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(11): 1849-1857.]

[23] Jiang H R, Ji L Y, Yu K, et al. Analysis of the substantial growth of water bodies during the urbanization process using landsat imagery—A case study of the Lixiahe region, China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(4): 711.

[24] 王晓飞, 黄粤, 刘铁, 等. 近60 a伊塞克湖水量平衡变化及影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1576-1587. [Wang Xiaofei, Huang Yue, Liu Tie, et al. Analysis of water balance change and influencing factors in Issyk-Kul Lake in recent 60 years[J].

Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1576-1587.]

[25] Tao S L, Fang J Y, Ma S H, et al. Changes in China's lakes: Climate and human impacts[J]. National Science Review, 2020, 7(1): 132-140.

[26] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87. [Wang Xiulan, Bao Yuhai. Research methods of land use dynamic change[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81-87.]

[27] Gök G, Gürbüz O A. Application of geostatistics for grid and random sampling schemes for a grassland in Nigde, Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(5): 1-12.

[28] Chen J H, Ma H C, Yang S, et al. Assessment of urban resilience and detection of impact factors based on spatial autocorrelation analysis and GeoDetector model: A case of Hunan Province[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2023, 12(10): 391.

[29] 田鹏, 李加林, 王丽佳, 等. 基于GTWR模型的浙江省海岸带三维生态足迹动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3173-3186. [Tian Peng, Li Jialin, Wang Lijia, et al. Dynamics of three-dimensional ecological footprint of Zhejiang coastal zone and its influencing factors based on GTWR model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3173-3186.]

[30] Mi Y F, Sun K, Li L, et al. Spatiotemporal pattern analysis of $PM_{2.5}$ and the driving factors in the middle Yellow River urban agglomerations[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299(1): 126904.

[31] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 383-401.

[32] 叶盼青, 阿不都艾尼·阿不里, 孙小丽, 等. 天山北坡经济带土壤重金属来源及污染评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4704-4712. [Ye Panqing, Abdugheni Abliz, Sun Xiaoli, et al. Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the economic belt on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4704-4712.]

[33] 何思聪, 董恒, 张城芳. 1994—2015年武汉城市圈湖泊演变规律及驱动力分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(10): 1260-1267. [He Sicong, Dong Heng, Zhang Chengfang. Analysis on dynamic changes and driving force of lake area in Wuhan City Circle from 1994 to 2015[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(10): 1260-1267.]

[34] 李旭冰. 西天山北麓湖泊时空动态变化及影响因素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. [Li Xubing. Study on Temporal and Spatial Dynamic Changes and Influencing Factors of Lakes at the Northern Foot of the West Tianshan Mountains[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.]

[35] 李江, 柳莹, 刘生云, 等. 新时期新疆水库大坝建设的主要问题与对策建议[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1409-1416. [Li Jiang, Liu Ying, Liu Shengyun, et al. Main problems and countermeasures of reservoir dam construction in Xinjiang in the new period [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1409-1416.]

Evolution characteristics of spatial and temporal distribution pattern and driving force analysis of reservoirs in the economic zone on the north slope of Tianshan Mountains

WANG Ting[1], SHEN Ganhua[2], LIU Bing[1,3], SUN Yinglin[1], WANG Zaiguang[4]

(1. Colleye of Water Conservancy & Architectural Engineerring, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Derun Economic Construction and Development Co. Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Cold and Arid Regions Eco-Hydraulic Engineering of Xinjiang Production & Construction Corps, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 4. Shihezi Tianxing Water Conservancy Survey and Design Institute, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: The temporal continuity and spatial equilibrium of reservoir group construction in the north slope of the Tianshan Mountain Economic Belt was verified, by extracting the water area of each reservoir from the 1990–2020 remote sensing data. The variation process of reservoir quantity and storage capacity was also analyzed by combining statistical data. The Moran index was used to quantify the aggregation degree of reservoir spatial distribution, and geographically and temporally weighted regression was established to analyze the driving factors of the reservoir. The results showed that in the past 30 years, the reservoir water area in the study region first increased by 46.25% from 1990 to 2015 and then decreased by 1.63% from 2015 to 2020. The number of reservoirs and storage capacity enhanced by 64.94% and 71.06% respectively. From 1990 to 2020, the Moreland index of the reservoirs in each representative year was 0.81, 0.83, 0.79, 0.91, 0.66, 0.73, and 0.78, respectively, along with a positive correlation between the spatial distribution of the reservoirs. The high-value area of reservoir distribution was mainly concentrated in the agricultural irrigation region of the Kuitun River Basin, and the low-value area in the industrial region was represented by Urumqi City. The main factors affecting the variation in reservoir capacity were evaporation, rainfall, elevation, population, and GDP. Evaporation adversely affected storage capacity, and the effect of rainfall was not uniform in space. Altitude and population had a positive impact on the construction of the reservoir in the west section and a negative influence in the east section. The GDP had a positive association with reservoir construction in the eastern section and a part of the western section, but a negative correlation in the middle section. These results can provide a reference for reservoir planning, construction, and operation management in similar areas.

Keywords: reservoir; temporal variation; spatial distribution characteristics; driving forces; geographically and temporally weighted regression